

FACHAUFSATZ

Artikelserie „Schadensanalyse von Elastomerbauteilen“

Explosive Dekompression und Explosive Verdampfung – Starke und plötzliche Druck- oder Temperaturänderungen können gravierende Dichtungsschäden verursachen

Erstveröffentlichung: 03/2018

Überarbeitete und erweiterte Version: 02/2025

Abstract

Bei der Verwendung von Dichtungen unter hohen Drücken kann das Schadensbild der explosiven Dekompression auftreten. Dabei dringen Gase unter hohem Druck bereits nach wenigen Stunden in den Elastomerwerkstoff ein. Wird der Druck schlagartig abgebaut, kann das eindiffundierte Gas nicht schnell genug entweichen und es kommt im Inneren der Dichtung zu Rissen und manchmal auch zu Blasen an der Oberfläche. Das Schadensbild der explosiven Verdampfung entsteht, wenn eine Dichtung in einem flüssigen Medium gequollen ist und diese Flüssigkeit durch schnelle Erhitzung oder einen raschen Druckabfall in die Dampfphase übergeht. Dadurch entstehen im Inneren der Dichtung Dampfblasen, welche Risse verursachen. Anhand von Bildbeispielen werden die Schadensmechanismen näher erklärt, es werden Präventionsmaßnahmen und Prüfmöglichkeiten zur Bestimmung der Widerstandsfähigkeiten von Elastomerwerkstoffen vorgestellt.

Explosive decompression and explosive evaporation

When using seals under high pressure, the failure due to explosive decompression can occur. Gases under high pressure diffuse into the elastomer already after a few hours. If the pressure is suddenly released, the diffused gas cannot escape quickly enough and cracks inside the seal and sometimes bubbles on the surface of the seal can appear. The failure due to explosive vaporisation occurs when a seal is swollen in a liquid medium and this liquid changes into the vapour phase due to rapid heating or a rapid drop in pressure. This creates vapour bubbles inside the seal, which cause cracks. The damage mechanisms are explained in more detail using illustrative examples, and preventive measures and testing options for determining the resistance of elastomer materials are presented.

1. Einordnung und Häufigkeit des Schadensbildes

Von den vier Hauptschadensmechanismen werden die explosive Dekompression und die explosive Verdampfung der 3. Hauptgruppe zugerechnet:

1. Medien
2. Temperatur / Alterung
- **3. Mechanisch / physikal. Einwirkungen**
4. Herstellungsfehler

Die 3. Hauptgruppe lässt sich in drei Untergruppen aufteilen: Falscher Einbauraum, Physikalische Überbeanspruchung durch Betriebsbedingungen und Montagefehler. Dieses Fehlerbild geht auf eine physikalische

Überbeanspruchung zurück und zählt innerhalb dieser Gruppe zu den häufigsten Ausfallursachen neben Spaltextrusion und Abrieb.

Autoren:

Dipl.-Ing. Maschinenbau

Bernhard Richter,

Geschäftsführer, OPR Group GmbH

E-Mail:

bernhard.richter@oprgroup.de

Dipl.-Ing. (FH) Kunststofftechnik

Ulrich Blobner,

Consultant, OPR Group GmbH

2. Fachliches Hintergrundwissen zum Schadensbild

2.1 Explosive Dekompression

Im Gegensatz zu Flachdichtungen im Krafthauptschluss sind O-Ringe durch ihre Fähigkeit zur Druckaktivierung ausgezeichnet für Hochdruckanwendungen bei Fluiden und Gasen geeignet. Infolge der chemischen Vernetzung sind Gummiwerkstoffe sehr gut druck-beständig, auch deutlich über 500 bar hinaus. Wasserstoff kann bspw. in Druckbehältern bei bis zu 1000 bar gelagert werden. Hier ist ein gut funktionierendes und robustes Dichtungssystem unbedingt notwendig. Daher müssen mögliche Versagens- und Schadensmechanismen im Detail verstanden werden, um diese bei der Auslegung und bei den Freigabeprüfungen ausreichend zu berücksichtigen. Ein zentraler Schadensmechanismus an O-Ringen bei hohen Drücken stellt die explosive Dekompression dar. Sie kann aber auch in geringerem Umfang an anderen Gummidichtungen vorkommen. Elastomere sind – je nach Basiselastomer und Füllstoffen – mehr oder weniger permeabel, d.h., dass Gase in den Gummiwerkstoff eindringen und auch wieder herausdiffundieren können. Je höher ein Gas unter Druck steht, umso leichter kann es in ein Elastomer eindringen. Wird dieser Druck im Dichtsystem – das längere Zeit (>2-4h) einem hohen Gasdruck (>30 bar) ausgesetzt war – schlagartig abgebaut, kann das eingedrungene Gas nicht schnell genug entweichen.

Eine schnelle bzw. „explosive“ Entspannung, häufig auf Umgebungsdruck, erzeugt im Inneren des O-Rings Risse, welche sich nach außen fortpflanzen können. Je nach Intensität der Beanspruchung können auch Blasen an der Oberfläche entstehen. Diese können aufplatzen und die Oberfläche beschädigen.

Das Schadensbild der „explosiven Dekompression“ ist seit vielen Jahrzehnten bekannt und wurde in der Literatur schon oft beschrieben. Weniger bekannt dagegen und in der Literatur nicht zu finden ist ein verwandter Risschadensmechanismus an Dichtungen aus einer Dampfblasenbildung heraus, nämlich die explosive Verdampfung (siehe Kap. 2.2).

2.1.1 Einfluss der Betriebsbedingungen

Zwar tritt das Schadensphänomen der explosiven Dekompression kaum unter 30 bar¹ auf, aber bereits ein einziger zu schneller Druckabbau kann schon zu Rissbildungen führen, was ein erhebliches Risiko für eine Leckage darstellt. Dies wird bei O-Ringen mit Abstand als das größte mögliche Hindernis beim Einsatz von diesen Dichtelementen bei hohen Drücken betrachtet, da dem Anwender für die Auslegung oft nur sehr unpräzise Informationen zur Verfügung stehen, welche in vielen Fällen auch noch irreführend sind. Es ist nicht einfach zu definieren, ab wann genau ein O-Ring eine kritische Beanspruchung auf explosive Dekompression erfährt. Dennoch stellt **Tab. 1** den Versuch einer Definition für als kritisch eingestufte Beanspruchungen auf explosive Dekompression dar:

Parameter	Fall 1	Fall 2
p_2 (Druck nach Entspannung)	< 2bar (d.h. Entspannung auf Umgebungsdruck)	> 20 bar (d.h. Entspannung auf Drücke > 20 bar)
$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\text{Druck vor Entspannung}}{\text{Druck nach Entspannung}}$	> 25	> 25
Kritische Druckänderungsrate für einen O-Ring mit d_2 (Schnurstärke) = 3mm	$> 4 \frac{\text{bar}}{\text{min}}$	$> 8 \frac{\text{bar}}{\text{min}}$
Kritische Druckänderungsrate für einen O-Ring mit anderer Schnurstärke d_2 in mm	$> 4 \frac{\text{bar}}{\text{min}} \frac{3\text{mm}}{d_2}$	$> 8 \frac{\text{bar}}{\text{min}} \frac{3\text{mm}}{d_2}$

Tab. 1: Versuch der Definition einer kritischen Druckänderungsrate, ab welcher die Gefahr eines Dichtungsschadens durch explosive Dekompression beginnt

¹ Vgl. PARKER HANNIFIN Corporation: Parker O-ring handbook, Cleveland, OH, 1991, S. A2-4: „We rarely see problems when the pressure is below 400 psi [=27,6 bar], and generally carbon dioxide

causes more swelling and damage than does nitrogen, although any pressurized gas may cause the condition.“

Zusammengefasst bedeutet das:

- Die Beanspruchung auf explosive Dekompression hängt nicht primär von der Druckdifferenz, sondern vom Verhältnis der Drücke vor ($= p_1$) und nach ($= p_2$) der Entspannung ab. So ist eine Entspannung von 100 auf 50 bar weniger kritisch als von 51 auf 1 bar.
- Das Risiko für Rissbildungen im Kern von O-Ringen ist für eine große Schnurstärke höher als für eine kleine Schnurstärke. Als Referenz-Schnurstärke werden hier 3 mm verwendet. So liegt die zulässige, d. h. als unkritisch betrachtete Entspannungsrate (in bar/min) für den Fall 1 (z.B. $p_1=30\text{bar}$, $p_2=1\text{ bar}$) bei einem O-Ring mit 3 mm Schnurstärke bei max. 4 bar/min, für eine Schnurstärke von 1 mm bei 12 bar/min und für einen O-Ring mit 6 mm Schnurstärke bei 2 bar/min. Liegt die wirkliche Druckänderungsrate in der Anwendung höher, wird von einem Schädigungsrisiko durch explosive Dekompression ausgegangen.

Diese Definition einer kritischen Beanspruchung soll eine grobe Orientierungshilfe sein, insbesondere können Temperaturen, Werkstoffeigenschaften und das verwendete Gas einen erheblichen zusätzlichen Einfluss auf kritische Beanspruchungsgrenzen haben. In der Praxis definiert man die Beanspruchung häufig über die angenommene Druckänderungsrate, z.B. 20 bar/min, das allein reicht aber für die Beurteilung des Versagensrisikos bzw. der O-Ring Auslegung nicht aus. Zum Beispiel ist auch das Verhältnis des Druckes p_1 vor und nach der Entspannung p_2 entscheidend (siehe Tab. 1). Im Alltag der Schadensanalyse von O-Ringen sind fast alle gefundenen Schädigungen auf unkontrollierte Entspannungen von hohen Drücken ($>30\text{ bar}$) auf Umgebungsdruck entstanden, z.B. an O-Ringen nach Notabschaltungen, wenn unkontrolliert auf Umgebungsdruck entspannt wurde. Da ist das Verhältnis von p_1/p_2 größer als 30, während dieses Verhältnis bei einer schnellen Druckabsenkung von 100 bar auf 50 bar nur bei 2 liegt. Darüber hinaus hat auch die Schnurstärke eine große Rolle (siehe 2.1.3). Daher enthält die Tab. 1 zur Definition einer kritischen Beanspruchung genau diese genannten Größen. Ferner ist die Temperatur ein entscheidender Einflussfaktor, siehe oben, sowie auch die Gesamtanzahl an

Druckzyklen. Dem Anwender muss auch bewusst sein, dass neben den Materialkennwerten einer Rezeptur auch der Herstellungsprozess der O-Ringe eine wichtige Rolle spielt. Eine Änderung kann die Anzahl der Lunken im Querschnitt erheblich erhöhen und damit auch die Anfälligkeit für Rissbildungen unter Beanspruchung auf explosive Dekompression.

2.1.2 Einfluss des Werkstoffes bzw. der Rezeptur

Das Aufnahmevermögen des Elastomers für das betreffende Gas, d. h. seine Löslichkeit und Permeabilität, hat einen starken Einfluss auf die Rissbildung. Im Idealfall nimmt der O-Ring wenig Gas auf (niedrige Permeationsrate) und gibt es wieder sehr schnell ab (hohe Permeationsrate), was gleichzeitig nicht möglich ist. Eine hohe Elastomerfestigkeit bzw. ein hoher Modul begrenzt die Ausbreitung der Gasbläschen. Eine hohe Permeationsrate zeigen z. B. Silikonwerkstoffe. Einen hohen Modul erreicht man mit einer hohen Härte, am besten mit hochaktiven Füllstoffen und einem hohen Molekulargewicht des Polymers. Schaut man sich die diesbezüglichen Empfehlungen der O-Ring-Hersteller für Anwendungen gegen explosive Dekompression an, findet man meistens FKM-, HNBR- und FFKM-Werkstoffe mit einer Härte von 90-95 ShA.

2.1.3 Einfluss der Schnurstärke

Die Schnurstärke hat einen erheblichen Einfluss auf die Entstehung von Rissen.² Dies wird aber kaum in der einschlägigen Literatur erwähnt. Je mehr freie Oberfläche bezogen auf das Volumen des O-Rings vorhanden ist, desto schneller kann das Gas nach der Entspannung entweichen. Das Verhältnis freier Oberfläche zum Volumen entspricht in etwa dem Verhältnis Umfang/Querschnittsfläche der Schnurstärke d_2 und ist damit proportional zum Quotienten $4/d_2$. Damit sinkt das Risiko auf Rissbildung mit abnehmender Schnurstärke. Für das geringere Rissrisiko gibt es aber noch einen zweiten Grund: Das höhere Verhältnis der freien Oberfläche zum Volumen hat auch Auswirkungen auf die Produktion, indem sich der Druck bei der Vulkanisation durch die Überfüllung der Kavität im Werkzeug auf weniger Volumen verteilt, was zu einer geringeren Neigung zur Fehlstellenbildung im Kern der O-Ringe führt.

Daher geht die Schnurstärke des O-Rings auch in die Bewertung mit ein, wann eine kritische Bean-

² Vgl. ROUTH, James Mathew: Prediction of explosive decompression Damage in Elastomer Seals, Ph.D Thesis, School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield University, BHR Group Limited, BP Amoco, 1999, S. 83, conclusions 3.10: "The larger

section seals are more likely to fail under explosive decompression conditions than smaller section seals." Dokument digital verfügbar: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/8752>

spruchung auf explosive Dekompression vorliegt, siehe **Tab. 1**. Konkret heißt das, dass man möglichst eine Schnurstärke von 1,78 mm wählen und dafür den Einbauraum bzw. das Durchmesserspiel eng tolerieren sollte.

Im Falle, dass noch kleinere Schnurstärken möglich sind, ist diesen Vorzug zu geben. Technologisch sind heutzutage Schnurstärken bis 1 mm Stand der Technik.

2.1.4 Einfluss der Herstellung

Dieser Punkt wird in der technischen Literatur kaum behandelt, hat aber in der Praxis einen sehr hohen Stellenwert: Im Querschnitt von O-Ringen befinden sich viele kleine Lunker, wovon die meisten einen Durchmesser von $<0,01$ mm haben. Darunter können aber auch Lunker sein, die wesentlich größer sind.³ So wurden bei ROUTH⁴ in vielen untersuchten Proben auch Lunker bis zu einem Durchmesser von 0,04 mm gefunden, in Ausnahmen sogar größere als 0,1 mm. „Lunker und starre Einschlüsse in der Elastomermatrix von Elastomerdichtungen gelten als einer der Hauptfaktoren, die zum Versagen unter schnellen Dekompressionsbedingungen beitragen. Die Anzahl der größeren Lunker und starren Einschlüsse (>20 μm) ist im Allgemeinen weitaus geringer als die Anzahl der kleineren Lunker und starren Einschlüsse. Sie werden jedoch als potenziell sehr wichtig für die Dekompressionsbeständigkeit angesehen, da die Aufblähung der Lunker in den größeren Lunkern und starren Einschlüssen wahrscheinlich bei einem viel niedrigeren Gasdruck beginnt. Größere Dichtungen mit größeren Schnurstärken enthalten auch größere Hohlräume.“⁵ Wegen der begrenzten Homogenität von Elastomeren, welche aus verschiedenen Feststoffen (Polymer, Füllstoffe, Chemikalien) bestehen, können diese kleinen Lunker nicht komplett vermieden werden. Dazu kommt noch, dass Restfeuchte in den Chemikalien aus der Vorlagerung unter Vulkanisationsbedingungen in den Dampfzustand übergeht und zu Bläschenbildungen führen kann. Zusätzlich können sich beim Vulkanisationsvorgang im Werkzeug weitere Gase als Reaktionsprodukte bilden. Das heißt, Bläschen bzw.

Lunkerstellen sind bis zu einer gewissen Ausprägung, siehe oben, mischungs- und produktionstechnisch nicht zu vermeiden. Damit muss man also die prinzipielle Eignung von Elastomeren für zyklische Beanspruchungen in Anwendungen, in welchen es Bedingungen für eine explosive Dekompression gibt, generell in Frage stellen. Unabhängig davon gibt es aber Materialien, die unter definierten Bedingungen eine kleine Anzahl an Zyklen ohne Leckage überstehen. Die einschlägigen Tests auf Resistenz gegenüber explosiver Dekompression⁶ sehen nur 8 Entspannungszyklen vor und lassen in der finalen Freigabebewertung auch Risse zu. So gilt der Test nach Tabelle B.4 nach DIN EN ISO23936-2⁷ als noch bestanden (Rating 3), auch wenn 2 Risse dabei sind, die in der Länge 50-80% der Schnurstärke betragen, die Anzahl an kleinen Rissen wird nicht begrenzt. Dieser Test stellt also keine Absicherung gegen eine zyklische Beanspruchung auf explosive Dekompression dar. Und selbst wenn O-Ringe in diesem Test mit besten Ergebnissen abschneiden, muss man sich die Frage stellen, ob unter Serienfertigung die gleiche Fertigungsqualität bezüglich Lunkerfreiheit erreicht werden kann wie bei den Freigabemustern.

2.1.5 Einfluss der Temperatur

Die physikalischen Belastungsgrenzen von Elastomeren sind stark temperaturabhängig. So zeigt beispielsweise ein HNBR-Werkstoff mit einer Zugfestigkeit von über 25 MPa bei Raumtemperatur nur noch eine Festigkeit von 15 MPa bei 100°C, bei 150°C sind es nur noch knapp 10 MPa⁸. Andere Elastomere wie FKM oder FFKM können diesbezüglich noch stärkere temperaturbedingte Änderungen aufweisen. Damit hat die Anwendungstemperatur einen erheblichen Einfluss auf die Rissentstehung und Rissfortpflanzung unter Beanspruchung auf explosive Dekompression. **Tab. 2** zeigt diesbezügliche Belastungsgrenzen von 2 FKM-Materialien⁹. Material A besteht den Belastungstest bis 350 bar bis 100°C, bei 180°C dagegen nur noch bei 35 bar!

³ Vgl. Ebd., chapter 4, S. 85ff.,

⁴ Vgl. Ebd., S. 94, Table 4.3

⁵ HO, Emily, BHR Group Limited: Elastomeric seals for rapid gas decompression applications in high-pressure services, HSE Health & Safety Executive research report 485, 2006, S. 34, Dokument digital verfügbar: <https://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr485.pdf>

⁶ DIN EN ISO23936-2 (März 2012) Nichtmetallische Werkstoffe mit Medienkontakt bei der Öl- und Gasproduktion-Teil 2-Elastomere

⁷ DIN EN ISO23936-2 (März 2012) Nichtmetallische Werkstoffe mit Medienkontakt bei der Öl- und Gasproduktion-Teil 2-Elastomere

⁸ Therban, Hydrogenated Acrylonitrile-Butadiene elastomers for High Performance Technical Rubber Goods, Bayer, Order No. KA 34 298 e, Edition 12.96

⁹ MORGAN, G.; CARKE, P.; MIRZA, S. und SMITH, N.: Herausforderungen extremer Temperaturen an elastomere Materialien, in GAK, 67. Jg., Heft 12, 2014, S. 768-776

Material	Prüf-temperatur [°C]	Druck [bar]			
		35	150	200	350
A	75			✓	✓
	100			✓	✓
	150			x	x
	180	✓	x	x	
B	75			✓	✓
	100			x	x
	150			✓/x	x
	180	x	x	x	

Tab. 2: Temperaturabhängige Belastungsgrenzen gegenüber explosiver Dekompression¹⁰: Die große Bedeutung des Temperatureinflusses wird an dieser Untersuchung gut erkennbar (✓ = bestanden x = nicht bestanden)

2.1.6 Einfluss des Einbauraumes

Mit dem Einbauraum lässt sich der Verformungsgrad des O-Rings und die Nutfüllung einstellen, allerdings immer nur in gewissen Bereichen, bedingt durch die Toleranzen der O-Ringe und der Einbauräume. Dadurch relativiert sich letztlich in der Praxis eine signifikante Einflussnahme. Erhöht man die Verpressung, erhöht man dadurch die inneren Druckspannungen und dadurch wirkt man der Ausdehnung von inneren Blasen entgegen. Gleichzeitig reduziert man dadurch die freie Oberfläche des O-Rings und damit behindert man das schnelle Ausgasen. Deshalb wird empfohlen, hier Standard-Einbauraum anzuwenden, z.B. nach ISO 3601-2. Daraus ergeben sich einmal bei größeren Schnurstärken geringere Verpressungen und die mittlere Nutfüllung liegt bei ca. 70-75%. Das deckt sich mit den Ergebnissen einer japanischen Studie von KOGA et al. ¹¹ aus dem Jahr 2011.

2.1.7 Einfluss des Gases

Die Anfälligkeit einer Dichtung für explosive Dekompression kann durch bestimmte Kombinationen von Gas und Elastomerwerkstoff signifikant erhöht werden.

Je mehr Gas in einem Elastomerwerkstoff gelöst werden kann, desto höher ist auch die Anfälligkeit für den Schadensmechanismus der explosiven Dekompression. Ein hoher Diffusionskoeffizient bzw. eine hohe

Gasdurchlässigkeit des Elastomers reduziert wiederum die Anfälligkeit dafür.¹²

GEORGE¹³ konnte 1997 in Zugversuchen in einem Temperaturbereich von 10°C bis 40°C nachweisen, dass Probekörper aus FKM und NBR, welche mit CO₂ gesättigt waren, stark geschwächt wurden. „Daher besteht bei einer Elastomerdichtung in einem Medium mit hoher CO₂-Konzentration bei Umgebungstemperatur ein höheres Risiko, dass die Dichtung durch eine schnelle Dekompression Schaden nimmt, als in einem Medium mit niedriger CO₂-Konzentration. Mit zunehmender Temperatur wird die Wirkung von Kohlendioxid auf die Festigkeit von Werkstoffen weniger bedeutend.“¹⁴

2.2 Explosive Verdampfung

Zur explosiven Verdampfung kommt es, wenn ein Medium, welches durch Quellung in eine Dichtung eingedrungen ist, schnell in die Gasphase überführt wird. Geht dieses eindiffundierte Fluid schlagartig von der Flüssigphase in die Dampfphase über, können sich im O-Ring kleine Dampfblasen bilden. Ein plötzlicher Übergang in die Dampfphase kann durch eine schnelle Überhitzung oder durch einen schnellen Druckabfall verursacht werden. Auch hier gilt, dass erhöhte Temperaturen die Anfälligkeit für Rissbildungen vergrößern. Gefunden wurde dieser Schadensmechanismus insbesondere an O-Ringen in Gleitringdichtungen, wo sich das typische Schadensbild der explosiven Dekompression zeigte, obwohl das abdichtende Medium ein Fluid war. So fand man beispielsweise an O-Ringen aus Gleitringdichtungen in Kältemittelkompressoren dieses Schadensbild nach einer eher geringen Laufleistung, während in derselben Anwendung die O-Ringe im Dauerbetrieb auch nach einer vielfachen Einsatzdauer noch komplett rissfrei waren.

¹⁰ Ebd.

¹¹ KOGA, Atsushi; UCHIDA, Kenichi; YAMABE, Junichiro; NISHIMURA, Shin: Evaluation on High-Pressure Hydrogen Decompression Failure of Rubber O-ring Using Design of Experiments in: International Journal of Automotive Engineering 2 (2011), S. 128f. (Artikel online verfügbar, zuletzt aufgerufen am 14.02.2025: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsaeijae/2/4/2_20114636/article)

¹² Vgl. Ebd. S. 127

¹³ GEORGE, A.F., SULLY, S. and DAVIES, O. M.: Carbon dioxide saturated elastomers : the loss of tensile properties and the effects of temperature rise and pressure cycling, 15th International Conference on Fluid Sealing, 1997, BHR Group Limited, S. 437 – 458.

¹⁴ HO, Emily, BHR Group Limited: Elastomeric seals for rapid gas decompression applications in high-pressure services, HSE Health & Safety Executive research report 485, 2006, S. 15, Dokument digital verfügbar: <https://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr485.pdf>

3. Schadensbild

3.1 Beschreibung des Schadensbildes und problematischer Bereiche

Das Schadensbild der explosiven Dekompression ist in seiner Ausprägung so charakteristisch, dass es relativ einfach zugeordnet werden kann. Typisch sind insbesondere äußere Blasen, die sich zurückbilden können. Es ist keine Delamination sondern eine Rissfortpflanzung, da die inneren Risse sich nach außen fortpflanzen, siehe **Abb. 1 bis 5**. Die Blasen an der Oberfläche (**Abb. 1**) hinterlassen nach dem Platzen kurze Risse an der Oberfläche (**Bild 2**). Darüber hinaus bilden sich Risse im Kern, siehe **Abb. 3 und 4**, welche sich fortpflanzen können und dann auch an der Oberfläche sichtbar sind (**Abb. 5**). Typisch ist für dieses Schadensbild, dass sich die O-Ringe bezüglich ihrer gefühlten Elastizität nicht oder nur kaum verändert haben, wie das bei einer unzulässigen thermischen oder chemischen Einwirkung der Fall ist.



Abb. 1: Blasen an der Oberfläche sind klare Hinweise auf eine Schädigung durch explosive Dekompression (Bild: OPR Elastolabs)



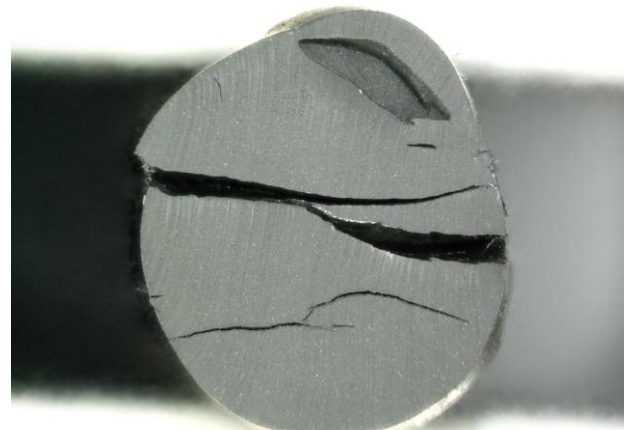
Abb. 2: Sind die Blasen geplatzt, hinterlassen sie kurze Risse in Umfangsrichtung an der Oberfläche (Bild: OPR Elastolabs)



Vergößerung: X50,0

0,500mm

Abb. 3: Innere Risse sind typisch für das Schadensbild der explosiven Dekompression (Bild: OPR Elastolabs)



Vergößerung: X30,0

Neigungswinkel: 0 Grad

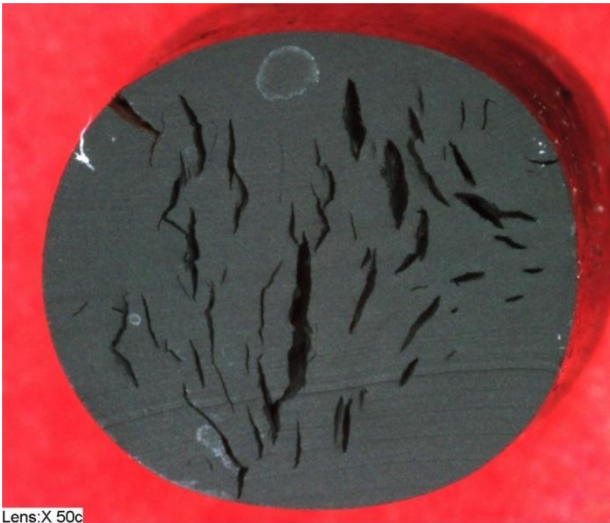
0,50mm

Abb. 4: Extreme innere Risse können im Rahmen einer explosiven Dekompression so groß werden, dass sie den O-Ring komplett zerstören (Bild: OPR Elastolabs)



Abb. 5: Die inneren Risse pflanzen sich häufig bis nach außen an die Oberfläche fort (Bild: OPR Elastolabs)

Das Schadensbild der explosiven Verdampfung unterscheidet sich nicht prinzipiell von der explosiven Dekompression, siehe **Abb. 6 und 7**, jedoch sind in vielen Fällen die Risse zahlreicher und kleiner. Die inneren Rissbildungen sind typisch für den Schadensmechanismus einer explosiven Verdampfung.



Lens: X 50c

Abb. 6: Explosive Verdampfung: FFKM O-Ring in einer Gleitringdichtung nach 16bar und 165°C in Wasser: Schädigung entweder durch mehrfaches Überhitzen beim Anfahren oder durch vorübergehenden Trockenlauf (Bild: OPR Elastolabs)



Vergrößerung: X50,0
Neigungswinkel: 0 Grad

Abb. 7: Innere Risse durch explosive Verdampfung (Bild: OPR Elastolabs)

3.2 Auswirkungen des Schadens

Jeder Riss in einer Elastomerdichtung stellt ein erhebliches Ausfallrisiko dar, auch wenn er zunächst noch klein ist. Da sich Elastomerdichtungen, wie zum Beispiel O-Ringe, unter Druckeinwirkungen verformen („walken“) entstehen dadurch im Inneren der Dichtungen Scherspannungen, welche zu einer Fortpflanzung vorhandener Risse führen können. Da der Widerstand gegen Rissfortpflanzung bei Elastomeren bei erhöhten Temperaturen stark abnimmt, muss davon ausgegangen werden, dass bereits ein einzelner innerer Riss zu einem Dichtungsausfall führen kann.

3.3 Abgrenzung zu ähnlichen Schadensbildern

Das Schadensbild der inneren Risse kann sich ebenfalls ergeben durch Spannungsrisse (**Abb. 8** und **9**) infolge zu hoher Verformung und der gleichzeitigen Einwirkung hoher Temperaturen oder durch Herstellungsmängel bei üblichen Verformungsgraden und typischer Temperatureinwirkung, siehe **Abb. 10**. Dagegen ist es in der Regel anhand nur der geschädigten Dichtung nicht möglich, das Schadensbild der „explosiven Dekompression“ vom Schadensbild der „explosiven Verdampfung“ zu unterscheiden. Wenn aber die Einsatzbedingungen der Anwendung bekannt sind, fällt die Unterscheidung sehr leicht.

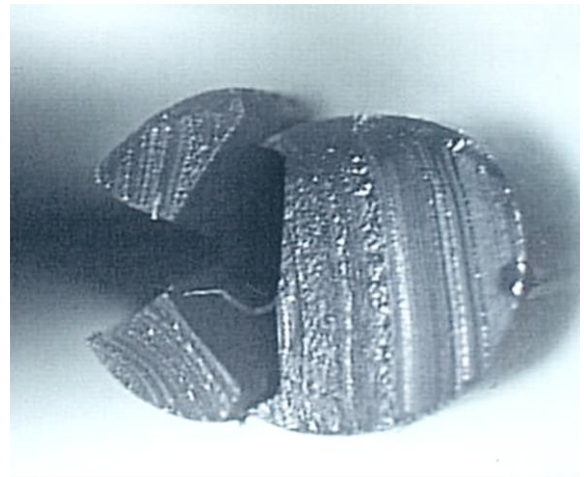


Abb. 8: Beispiel eines Spannungsrisses an einem O-Ring Querschnitt (Bild: OPR Elastolabs)

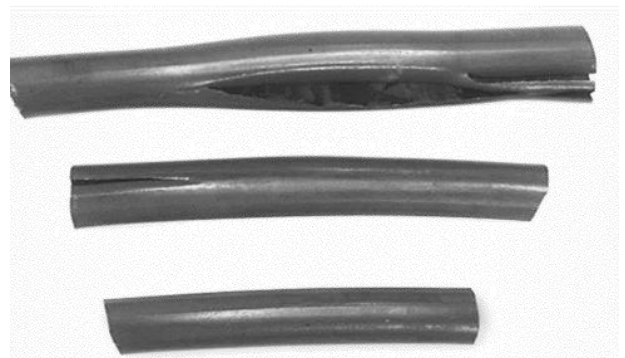


Abb. 9: Spannungsrisse an O-Ring Abschnitten (Bild: OPR Elastolabs)

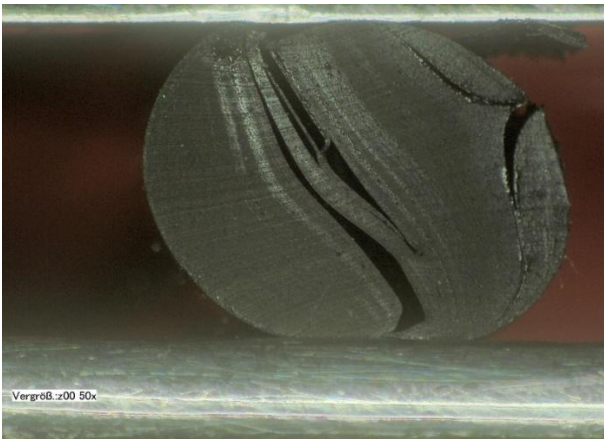


Abb. 10: Risse durch Herstellungsmängel und der Einwirkung üblicher Verformungen und Temperaturen (Bild: OPR Elastolabs)

4. Präventionsmaßnahmen

Eine wichtige Voraussetzung für eine gute Dichtfunktion ist erst zunächst der richtige Einbauraum. Das erfordert bei sehr hohen Drücken besondere Maßnahmen zur Vermeidung einer Spaltextrusion, wie z. B. die Begrenzung der Spaltmaße auf unter 0,05 mm und/oder die Verwendung hochfester Stützringe. Bezüglich Gasdichtheit gilt es, die O-Ringe ausreichend zu verpressen und die Oberflächenausführung der Dichtflächen in Bezug auf Rauheit und Struktur zu optimieren (Querstrukturen müssen vermieden werden). Lässt sich die Anzahl an Entlastungszyklen begrenzen, kann der Einsatz von speziellen Rezepturen (Norsork M 710-Zulassung) weiterhelfen. Bedingt durch das kleinere Verhältnis freier Oberfläche zur Masse nimmt die Anfälligkeit von O-Ringen mit zunehmender Schnurstärke zu. Auch erhöhte Temperaturen ($> 60^{\circ}\text{C}$) erhöhen das Risiko für Rissbildungen, da die Belastungsgrenzen von Elastomeren bei höheren Temperaturen sinken.

Und dennoch kann der Schadensmechanismus der explosiven Dekompression immer noch die Anwendbarkeit von O-Ringen in Frage stellen. Hier sollte bzw. muss kritisch hinterfragt werden, ob O-Ringe – trotz Verwendung von Sonderwerkstoffen („resistent gegenüber explosiver Dekompression“) – ausreichend robuste Lösungen darstellen. Findet eine kritische Beanspruchung auf explosive Dekompression zyklisch statt, so sollte der Einsatz von Elastomeren kritisch hinterfragt werden, da Elastomere immer eine begrenzte Inhomogenität im Werkstoff besitzen. Dies begünstigt die Bildung von Mikrorissen, welche sich dann zu Rissen fortpflanzen können. Erst wenn durch ausreichende Versuche unter „worst-case“-Bedingungen die ausreichende Funktionalität der Dichtungen

nachgewiesen ist, sollten Elastomerdichtungen eingesetzt werden. Ansonsten muss auf alternative Dichtungslösungen ausgewichen werden (siehe Kap.5).

5. Praxistipps (Prüfmöglichkeiten/Normempfehlungen)

Mit Hilfe von speziellen Prüfverfahren lässt sich die Widerstandsfähigkeit gegen explosive Dekompression verschiedener Elastomere miteinander vergleichen.

Bekannt sind der Norsork M-710 Standard und NACE-Standards. Diese Tests verwenden die Fachabkürzung RGD (= Rapid Gas Decompression) bei der Bestimmung der Widerstandsfähigkeit gegenüber Explosiver Dekompression. Zu berücksichtigen ist, dass diese Tests als positiv bewertet werden, auch wenn sich noch im erheblichen Maße Risse gebildet haben und nur eine sehr begrenzte Anzahl an Druckzyklen geprüft wird.

O-Ringe zeigen material- und herstellungsbedingt eine hohe Anfälligkeit gegenüber einer zyklischen Beanspruchung auf explosive Dekompression, auch Sonderwerkstoffe, welche von Dichtungsherstellern als „beständig gegen explosive Dekompression“ bezeichnet werden. Das bedeutet, dass eine sichere Auslegung nur dann gegeben ist, wenn die Worst-Case-Parameter der Beanspruchung ausreichend durch Versuche abgesichert werden. Diese sollten bei maximaler Auslegungstemperatur, unter ungünstigsten Druckänderungen (p_1/p_2) und bei maximaler Zykluszahl geprüft werden. Eine pauschale Materialfreigabe stellt keine ausreichende Absicherung dar, da auch die Schnurstärke und der Herstellungsprozess der O-Ringe (siehe oben) einen Einfluss auf die Resistenz haben. Daher sollte auch der Einsatz robusterer Dichtungen in Erwägung gezogen werden.

Wenn man nach robusteren bzw. alternativen Dichtungslösungen sucht, welche einen ähnlich kleinen Einbauraum wie O-Ringe benötigen und auch bei hohen Drücken eingesetzt werden können, so kommen PTFE-U-Cup-Dichtungen oder auch thermoplastische Polyurethan O-Ringe in Frage. Natürlich müssen diese ausreichende Dichtheitswerte erreichen und ebenso für Hochdruckanwendungen über den geforderten Temperaturbereich geeignet sein.

6. Sonstiges

Dieser Artikel erschien in einer Kurzfassung in der Zeitschrift DICHT!, Ausgabe 02/2018. Teile dieser Langversion wurden von Bernhard Richter auf dem

XXIII. Dichtungskolloquium am 21. September 2023 in Düsseldorf unter dem Titel „Einsatzgrenzen von O-Ringen in Gasen unter sehr hoher Druckbeanspruchung“ vorgetragen.

Ebenso erscheinen Teile aus dieser Langversion im Dichtungstechnik Jahrbuch 2025 im Aufsatz „Welche Maximaldrücke verträgt ein O-Ring? – Herausforderungen durch die Energiewende, besonders bei Wasserstoffanwendungen“.